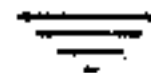


ПРИМЕЧАНИЯ
РЕДАКТОРА
И
ПЕРЕВОДЧИКА



О ФАРАДЕЕВЫХ СИЛОВЫХ ЛИНИЯХ

1. (Стр. 11.) *Джеймс Клерк Максвелл* происходил из знатной и богатой шотландской семьи. Его отец владел имением Гленлер вблизи Эдинбурга. Здесь 13 июня 1831 г. родился будущий знаменитый ученый.

Уже учеником средней школы в Эдинбурге Максвелл выполнил первую научную работу по геометрии и, обучаясь в Эдинбургском университете, работал самостоятельно над проблемами геометрии и механики.

С 1850 г. Максвелл учится в Кембридже в том самом Тринити-Колледже, где учился и работал когда-то Ньютон. Здесь он изучает механику, физику, геометрию и здесь он начинает свои исследования по теории электричества и эксперименты по теории цветов.

По окончании Кембриджа Максвелл остается в нем в качестве члена Колледжа еще на два года. С 1856 г. он преподает физику в Абердине (Шотландия) и занимается проблемой устойчивости колец Сатурна и исследованиями в области динамики твердого тела. С 1860 г. Максвелл руководит кафедрой физики в Королевском Колледже в Лондоне. В этот период он разрабатывает проблемы кинетической теории газов, теории упругости, продолжает свои исследования по теории электричества, активно участвует в работе по стандартизации электрических единиц.

С 1865 г. Максвелл оставляет службу и живет как частное лицо в своем имении. Здесь он подготавливает свой знаменитый «Трактат об электричестве и магнетизме».

В 1871 г. Максвелл принимает предложение Кембриджского университета взять руководство строительством и организацией лаборатории имени Кавендиша. Максвелл до самой смерти, последовавшей 5 ноября 1879 г., стоял во главе этого известного научного учреждения, которым после его смерти руководили последовательно Релей, Дж. Дж. Томсон, Резерфорд.

Время работы Максвелла совпало с временем наивысшего развития британского монополюстического капитализма. За счет ограбления колоний, и в первую очередь Индии, английская

буржуазия могла щедрее, чем где бы то ни было на континенте, финансировать научные учреждения, как, например, ту же кембриджскую лабораторию Кавендиша. Вместе с тем науке была предоставлена относительная свобода и самостоятельность. Самое мышление ученых британских островов отличалось конкретностью, почти, так сказать, грубо механической осязаемостью. Дюгем, характеризуя модельные представления британских ученых, с возмущением отмечал, что думаешь попасть в упорядоченное математическое хозяйство, а попадаешь на какой-то завод. Нельзя не признать, что Дюгем правильно связывает эту черту мышления английских физиков со стремлением английских дельцов капитала к быстрейшему извлечению прибыли из научных знаний, вследствие чего забота о безупречном логическом оформлении теории отходила на второй план. И не случайно, что как сам Максвелл, так и В. Томсон и другие современники и преемники этих ученых, живо интересовались вопросами практических приложений науки. Стоит только вспомнить труды Томсона по прокладке трансатлантического кабеля и работы Максвелла по прикладной механике и в Комитете по электрическим единицам. Конечно, максимальное приближение ученых к практике—положительное явление, но в условиях капиталистической действительности за этим обычно скрываются интересы наживал капитала. Следует отметить, что в творчестве и мировоззрении английских физиков этой эпохи отразились и типично ханжеские черты лицемерной английской буржуазии.

У Максвелла, В. Томсона и др. мы нередко встречаем поповские утверждения, вроде взглядов Максвелла, что к атомам и молекулам неприменима идея эволюции, что неизменные атомы несут на себе отпечаток черт их сотворившего. Тем интереснее и значительнее те элементы стихийного материализма и даже стихийной диалектики, которые мы находим в творчестве Максвелла, свидетельствующие о том, что сама жизнь, правда науки, брама верх и побеждала буржуазную ограниченность ученого.

В целом научное творчество Максвелла было прогрессивным и открыло в истории физики новую и важную страницу.

Научные результаты Максвелла обширны и разнообразны. Он был глубоким теоретиком и блестящим экспериментатором. Он с одинаковым успехом разрабатывал сложные теоретические проблемы и вопросы чисто прикладного значения. Наряду с фундаментальными оригинальными исследованиями его перу принадлежит большое количество образцовых научно-популярных книг и статей. Он с успехом конструировал приборы и модели, разрабатывал измерительные схемы и методы измерений и, наконец, глубоко интересовался проблемами истории науки.

В этой блестящей и многогранной деятельности первое место принадлежит разработанной им теории электромагнитного поля, увенчанной созданием электромагнитной теории света—этим замечательным синтезом физики второй половины XIX века.

Историю формирования и развития электромагнитной теории Максвелла читатель может проследить по приведенным его основным работам.

2. (Стр. 11.) Работой «О фарадеевых силовых линиях» Максвелл начал свои классические исследования по электричеству и магнетизму, еще будучи студентом Кембриджа (1855—1856 гг.). (Опубликована она была значительно позже, в 1864 г.) К этому времени макроскопическая электродинамика достигла больших успехов. Исследованиями Ампера были установлены законы ponderomotorных действий токов, Фарадей, Ленц и Нейман установили закон электромагнитной индукции, после работ Шиллинга, Морзе и Якоби началась эпоха технических приложений электричества. На очереди стоял вопрос о создании теории электромагнетизма, охватывающей разнообразные и сложные проявления электромагнитных взаимосвязей.

Успехи небесной механики и математической теории электростатики и магнетостатики (Лаплас, Остроградский, Пуассон, Грин, Гаусс) направили мысль теоретиков (в первую очередь В. Вебера) на поиски элементарного закона взаимодействия электрических зарядов. Замечательно, что, идя этим путем, Вебер пришел к концепции атома электричества, однако в формуле Вебера сила взаимодействия оказалась зависящей не только от мгновенного положения электрических зарядов, но и от их относительных скоростей и ускорений. Серьезные сомнения вызывал вопрос о совместимости закона Вебера с законом сохранения энергии (дискуссия Гельмгольца и Вебера*). Наконец, роль среды в электрических и магнитных взаимодействиях была уже твердо установлена (Фарадей), и недоверие физиков к закону Вебера возрастало. Уже Гаусс в 1845 г. указывал в письме к Веберу на необходимость допущения концепции конечной скорости распространения электрических сил. С другой стороны, Фарадей с 1821 г. успешно и плодотворно развивал идею определяющей роли среды в электрических и магнитных взаимодействиях и тесной взаимосвязи всех процессов (электрических, магнитных, световых, гравитационных), разыгрывающихся в среде.

Оригинальный метод Фарадея, прибегавшего к построению своеобразных конструкций (трубок) для описания процессов в среде, был чужд физикам-теоретикам и не был понят ими. Максвелл в этой работе, развивая фарадеевскую концепцию, получает, исходя из модели движения некоторой гипотетической жидкости, те результаты, которые были получены Пуассоном, Лапласом, Грином, Гауссом, В. Томсоном и др. математическим путем. Однако результаты Максвелла значительнее. Так, он в этой

*) См. гл. XXIII «Трактата» Максвелла, стр. 621 и далее настоящего издания.

работе дает уже первоначальную формулировку своих знаменитых уравнений (правда, без установления понятия тока смещения и дискуссии следствий о конечной скорости распространения электромагнитного поля). Больцман прав, говоря в своих примечаниях к этой работе (см. стр. 90), что она доказывает, «... что он (т. е. Максвелл) работал по хорошо обдуманному заранее плану».

В настоящем издании использованы некоторые примечания Больцмана, сделанные им для немецкого издания («Оствальдовские классики», № 69). Опушен последний раздел работы, посвященный методу электрических изображений. (Ред.)

3. (Стр. 12.) Замечание Максвелла: «необходимо прежде всего упростить выводы прежних исследований и привести их к форме, наиболее доступной восприятию», иногда пытались рассматривать как выражение пресловутого махистского «принципа экономии».

На самом деле метод Максвелла ничего общего не имел с принципом экономии и другими атрибутами махизма. Максвелл разделял стихийное материалистическое убеждение естествоиспытателей в объективном существовании внешнего мира, в его материальном единстве, в познаваемости человеком объективных закономерностей природы.

Указанное замечание Максвелла, равно как и аналогичные высказывания Ньютона («Природа проста и не роскошествует излишними причинами») и Ломоносова («Природа весьма проста, что этому противоречит должно быть отвергнуто»), является отражением единства материальной природы при всем бесконечном разнообразии ее проявлений. Именно это единство дает возможность Максвеллу широко использовать метод физических аналогий, установить связь уравнений, описывающих различные классы физических явлений. Сравните, например, у Ломоносова: «Природа крепко держится своих законов и всюду одинакова» или у Столетова: «Не говорят ли они (факты спектрального анализа. — Ред.) красноречивее, чем что-либо с тех пор, как открыто всемирное тяготение, не говорят ли они о вещественном единстве и общем происхождении видимой нами вселенной». Максвелл приводит в качестве примера аналогии тот факт, что закон стационарного распределения температур в теле и закон распределения гравитационного потенциала вне тяготеющих масс выражаются одним и тем же уравнением Лапласа.

Ленин, цитируя речь Больцмана на Мюнхенском съезде естествоиспытателей в 1899 г., писал: «Единство природы обнаруживается в „поразительной аналогичности“ дифференциальных уравнений, относящихся к различным областям явлений» («Материализм и эмпириокритицизм», стр. 272, 1948). Разаумеется, это единство не означает однообразия, так же как аналогия — тождества. (Ред.)

4. (Стр. 14.) Это, конечно, преувеличенная оценка влияния теорий дальнего действия на развитие науки. Теория дальнего действия с самого момента ее возникновения встречала активных и сильных противников (Декарт, Гюйгенс, Ломоносов, Эйлер и др.). Но эта оценка интересна как характеристика тех умонастроений в теоретической физике, которые господствовали в тот период, когда Максвелл вступил в борьбу за внедрение в физику идей Фарадея. (Ред.)

5. (Стр. 15.) Здесь в первый раз Максвелл говорит о математическом характере метода Фарадея, не пользовавшегося, как известно, в своих работах даже элементарной алгеброй. Позднее он настоятельно будет говорить об этом в своем известном «Предисловии» к «Трактату» (настоящее издание, стр. 349). Одна из задач работы «О фарадеевых силовых линиях» как раз и заключается в переводе идей Фарадея на язык математики (геометрии и анализа). (Ред.)

6. (Стр. 16.) Подчеркивая иллюстративный характер своей аналогии, Максвелл указывает на недопустимость отождествления его воображаемой жидкости как с реальной жидкостью, так и гипотетическими невесомыми жидкостями XVIII века. (Ред.)

7. (Стр. 17.) Используя метод аналогий, Максвелл начинает изложение теории электричества и магнетизма (в первую очередь основ электростатики и магнитостатики) с помощью гидродинамической модели. Этот прием Максвелла оказался весьма плодотворным. В теории поля до сих пор удержались термины «источники», «дивергенция», «вихрь», обязанные своим происхождением гидродинамической аналогии. Сама эта аналогия в дальнейшем развитии пережила новую ступень: применение электродинамических аналогий в гидродинамике. Вообще метод Максвелла допускал в большом количестве использование аналогий и моделей. Однако Максвелл никогда не рассматривал аналогию как тождество и модель, как исчерпывающую изучаемые явления и закономерности. Они служили у него ступенями в процессе познания природы и использовались постольку, поскольку помогали правильно отражать те или иные черты исследуемых процессов. Поэтому Максвелл, например, никогда не заботился о том, чтобы построить единую непротиворечивую механическую модель электромагнитных явлений, а использовал одновременно несколько моделей, иногда даже противоречащих друг другу.

Не настаивая нигде на окончательном характере своих моделей и аналогий, Максвелл мог свободно оперировать с такими образами, как образ жидкости в рассматриваемой работе. Отметим, что идея Максвелла сведения статических взаимодействий к динамическим процессам (хотя бы в виде построения модели движения воображаемой жидкости) имеет очень глубокое

принципиальное значение и неоднократно поднималась выдающимися теоретиками (например, Н. Умовым, Герцем, Дж. Дж. Томсоном). (Ред.)

8. (Стр. 22.) Больцман в примечании 3 указывает, что аналогичную идею представления силового поля гипотетической жидкостью, обладающей источниками, развивал Риман (см. русское издание его сочинений «Новые математические принципы натурфилософии», стр. 468—469, ГТТИ, 1948). При этом Больцман правильно противопоставляет идеалистическо-мистические предпосылки Римана, обосновывающего идею источников тем, что «в основе всякого акта нашей души лежит „остающееся“, вступающее в нашу душу при этом акте, но в тот же момент окончательно исчезающее из мира явлений», простой математической гипотезе Максвелла о существовании источников движения жидкости, дальнейшее исследование которых не нужно для поставленной автором задачи. (Ред.)

9. (Стр. 24.) Так как Максвелл по условию рассматривает установившееся движение жидкости, то инерционные явления в его картине роли не играют. Однако для его теории важно исследование роли среды в электромагнитных явлениях, поэтому он с самого начала вводит идею о силах сопротивления среды, посредством которой он и дает интерпретацию изменения поля в веществе, электрических и магнитных характеристик вещества. (Ред.)

10. (Стр. 24.) В уравнении Эйлера

$$\rho \left(f - \frac{dv}{dt} \right) - kv = \text{grad } p.$$

Согласно условию полагаем $\rho=0$. (Ред.)

11. (Стр. 27.) Здесь и в дальнейшем речь идет об определении потенциального поля по его источникам. Связь поля (в интерпретации Максвелла—поля скоростей v) с источниками e дается теоремой Остроградского-Гаусса:

$$\oint v_n dS = 4\pi e,$$

а поля с давлением (потенциалом)—формулой

$$v = -\frac{1}{k} \text{grad } p.$$

Таким образом, легко все выводы Максвелла перевести на язык современной теории потенциального поля. (Ред.)

12. (Стр. 30.) Если интерпретировать давление p как потенциал, скорость—как индукцию, то коэффициент сопротивления

приобретает смысл $\frac{1}{\epsilon}$, где ϵ — диэлектрическая постоянная, и высказанное здесь Максвеллом предложение означает, что при заполнении пространства диэлектриком при неизменных потенциалах плотность свободных зарядов возрастает в ϵ раз. (Ред.)

13. (Стр. 31.) Здесь Максвелл впервые в макроскопической электродинамике прибегает к введению так называемых фиктивных зарядов. (Ред.)

14. (Стр. 48.) Для утверждения законов стационарного электрического тока чрезвычайно большую роль сыграли исследования Ленца. Закон Ома внедрялся в физику с большим трудом, и Ленцу пришлось немало потрудиться, чтобы рассеять ряд заблуждений (вроде гипотезы о «сопротивлении перехода» в жидких проводниках), господствовавших у физиков в отношении закономерностей тока. Ленцу же принадлежит первое решение задачи о распределении тока в системе разветвленных проводников, и в этом отношении он является прямым предшественником Кирхгофа. Что касается упоминаемой Максвеллом работы Кирхгофа о проводимости пластинок, то эта задача была рассмотрена Кирхгофом для частного случая плоскости, а Больцманом для сферы и круглого цилиндра. В 1875 г. задача для общего случая проводящих поверхностей была решена Н. А. Умовым в работе «О стационарном движении электричества на проводящих поверхностях произвольного вида».

Эту работу Умов представил Кирхгофу, который вскоре опубликовал работу с теми же результатами, полученными несколько отличным методом, в которой он, хотя и упоминает об Умове, но не отмечает должным образом его приоритета. (См. Н. А. У м о в, Избр. сочин., стр. 21, 447, 1950). (Ред.)

15. (Стр. 49.) По Максвеллу не должно существовать абсолютно непреходимой границы между проводниками и изоляторами. Именно эта идея приведет его в конце концов к установлению понятия тока смещения. (Ред.)

16. (Стр. 52.) Аналогия, развиваемая здесь Максвеллом, приводит в ее дальнейшем развитии к расчетным формулам магнитных цепей (формула Гопкинсона). Конечно, эта аналогия весьма поверхностна, и магнитная проницаемость не аналогична электропроводности. Однако наличие тепловых потерь в ферромагнетиках в переменных полях дало повод проф. В. К. Аркадьеву обобщить второе уравнение Максвелла, введя в него коэффициент магнитной проводимости, характеризующий эти потери. (См. В. К. А р к а д ь е в, «Электромагнитные процессы в металлах», т. II.) (Ред.)

17. (Стр. 59.) Характерный пример «обтекания» трудности при помощи формально-математических средств. В современной теоретической физике этот прием очень распространен. (Ред.)

18. (Стр. 69.) Это уравнение есть не что иное, как первое уравнение Максвелла в рационализованной системе единиц для стационарных токов, которое в современной векторной форме имеет вид

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}.$$

Максвелловского обобщения понятия тока, включающего ток смещения, здесь еще нет. (Ред.)

19. (Стр. 71.) Это равенство получается из формулы Грина

$$\int \{\psi \Delta \varphi + \nabla \psi \nabla \varphi\} dV = \oint_S \psi \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS,$$

если иметь в виду, что в бесконечности

$$\oint_S \psi \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS = 0. \quad (\text{Ред.})$$

20. (Стр. 71.) Под потенциалом системы самой на себя Максвелл имеет в виду собственную энергию непрерывно распределенных источников,

$$W = \frac{1}{2} \int \varphi \rho dV,$$

которая может быть преобразована в интеграл по объему поля

$$W = \frac{1}{8\pi} \int E^2 dV$$

с помощью предыдущей формулы Грина и уравнения Пуассона. Множитель $1/2$ здесь и в дальнейших выкладках Максвелла отсутствует. (Максвелл исходит из формулы Грина, полагая $\psi = \varphi$, $\Delta \varphi = -4\pi\rho$.) (Ред.)

21. (Стр. 73.) В современных обозначениях теорема V формулируется так. Дан соленоидальный вектор \mathbf{B} :

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0,$$

тогда

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}.$$

Задача решается с точностью до произвольного потенциального вектора $\mathbf{A}' = \operatorname{grad} \psi$ (калибровочная инвариантность). Скаляр ψ может быть определен, если известна $\operatorname{div} \mathbf{A}$. Если $\operatorname{div} \mathbf{A} = 0$, то $\mathbf{A}' = 0$. (Ред.)

22. (Стр. 77.) Теорема VI — обобщение предыдущей. Дан вектор \mathbf{B} и распределение его источников:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = -4\pi\rho,$$

тогда

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} + \operatorname{grad} \varphi. \quad (\text{Ред.})$$

23. (Стр. 78.) Пусть a, b, c — компоненты некоторого вектора \mathbf{B} , причем $\operatorname{div} \mathbf{B} = -4\pi\rho$; α, β, γ — компоненты другого вектора \mathbf{H} , причем $\operatorname{div} \mathbf{H} = -4\pi\rho'$. В теореме VII речь идет о преобразовании объемного интеграла

$$Q = \int \mathbf{B} \mathbf{H} dV.$$

По предыдущему

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A} + \operatorname{grad} \varphi,$$

где \mathbf{A} — вектор-потенциал с компонентами α, β, γ . Кроме того, введем вектор $\mathbf{j}(a, b, c)$ по уравнению $\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j}$. Далее,

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = \Delta \varphi = -4\pi\rho,$$

$$\operatorname{div} \mathbf{H} = \Delta \rho = -4\pi\rho'$$

Заменив в Q вектор \mathbf{B} его выражением, получим:

$$Q = \int (\mathbf{H} \operatorname{rot} \mathbf{A} + \mathbf{H} \operatorname{grad} \varphi) dV.$$

Используя равенства

$$\operatorname{div} [\mathbf{A} \mathbf{H}] = \mathbf{H} \operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{A} \operatorname{rot} \mathbf{H}$$

и

$$\operatorname{div} (\varphi \mathbf{H}) = \varphi \operatorname{div} \mathbf{H} + \mathbf{H} \operatorname{grad} \varphi,$$

получаем:

$$Q = \int \operatorname{div} [\mathbf{A} \mathbf{H}] dV + \int \mathbf{A} \operatorname{rot} \mathbf{H} dV + \int \operatorname{div} (\varphi \mathbf{H}) dV - \int \varphi \operatorname{div} \mathbf{H} dV.$$

Первый и третий интегралы преобразуются по теореме Остроградского-Гаусса и на бесконечно удаленной границе обращаются в нуль. Следовательно,

$$Q = - \int \varphi \operatorname{div} \mathbf{H} dV + \int \mathbf{A} \operatorname{rot} \mathbf{H} dV,$$

что совпадает за исключением начертания формулы и знака во втором интеграле (примечание 35 Больцмана) с выражением Максвелла. Далее,

$$\int A \operatorname{rot} \mathbf{H} dV = \int A j dV,$$

$$-\int \varphi \operatorname{div} \mathbf{H} dV = \int \varphi 4\pi \rho' dV.$$

По теореме Грина (теорема III)

$$\int \varphi 4\pi \rho' dV = - \int \varphi \Delta p dV = - \int p \Delta \varphi dV = 4\pi \int p \rho dV$$

и

$$Q = \int (4\pi p \rho + A j) dV.$$

Это выражение с точностью до постоянных множителей совпадает с выражением магнитной энергии токов и магнитных масс:

$$W = \frac{1}{2} \int p \rho dV + \frac{1}{2} \int A j dV. \quad (\text{Ред.})$$

24. (Стр. 80.) Максвелл придавал идее Фарадея об «электротоническом» состоянии важнейшее значение. Он связывал ее с представлением о магнитном потоке и его инерционных свойствах. Ряд последующих работ Максвелл посвящает развитию этой идеи, в которой он, с одной стороны, усматривал возможность перебросить мост к механике, а с другой — возможность связать идеи Фарадея с работами математиков-физиков. Для этой цели он и вводит функцию вектора-потенциала, которая должна служить векторной характеристикой электротонического состояния. Идея электротонического состояния у Фарадея возникла в связи с описанием индукционных процессов, в которых проявляются с очевидностью свойства, аналогичные инерционным. Основываясь на аналогии с выражением силы инерции в механике

$$f = - \frac{dp}{dt},$$

Максвелл полагал, что в электродинамике аналогичное соотношение будет:

$$\mathbf{E} = - \frac{dA}{dt},$$

где A — вектор-потенциал, \mathbf{E} — напряженность индуцированного электрического поля. Поэтому он и называл вектор-потенциал «электромагнитным количеством движения» (momentum). Впоследствии, однако, он отказался от этой аналогии. Если перенести обобщенные координаты и импульсы Лагранжа в электродинамику, то обобщенными силами оказываются электродвижущие силы, а роль обобщенного импульса играет магнитный поток. (Ред.)

25. (Стр. 82.) Уравнения $a_2 = -\frac{1}{4\pi} \frac{da_0}{dt}$ и т. д., которые можно представить в векторной форме:

$$\mathbf{E} = - \frac{1}{4\pi} \frac{dA}{dt},$$

являются зерном второй группы уравнений Максвелла. Максвелл при формулировке этих уравнений уже намечает и проблемы электродинамики движущихся сред в духе Герца. (Ред.)

26. (Стр. 86.) В этих шести законах уже содержится очерк будущей теории Максвелла, причем автор указывает на предварительный характер этой теории и ее стимулирующее значение для будущих исследований в области электричества. Видно из всего обзора, что математическая трактовка электромагнитного поля у Максвелла уже сложилась, однако ему не вполне ясен механический смысл вектора-потенциала, тем не менее Максвелл, подчеркивая предварительный характер своей теории, указывает на ее важное эвристическое значение. Вместе с тем Максвелл не считает законченной и свободной от возражений формальную теорию Вебера. (Ред.)